策勒河下游风积地貌沉积物粒度特征及沙源分析

李鑫鑫[1,2]， 毛东雷[1,2]， 来风兵[1,2]， 薛 杰[3,4]， 何强强[1,2]， 马玉娇[1,2]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830054；3. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；4. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站，新疆 策勒 848300）

摘 要：沉积物的粒度特征记载了丰富的环境变化信息，对研究沙漠治理和荒漠化防治具有重要意义。运用粒度分析、粒级-标准偏差法和Sahu成因判别等研究方法进行分析，研究了不同风积地貌沉积物粒度特征和沉积环境的稳定性。结果表明：(1) 新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地表层沉积物均以中砂、细砂、极细砂为优势粒级，新月形沙丘表层沉积物平均粒径最粗，为270.42 μm，灌丛沙丘表层沉积物平均粒径最细，为95.60 μm。(2) 三种地貌类型沉积物分选性较差，占比分别为74.47%、90.47%和66.7%，新月形沙丘表层沉积物呈现负偏分布、中等峰态，灌丛沙丘和低裸平沙地表层沉积物呈现对称分布、中等峰态和窄峰态。(3) 三种不同风积地貌环境敏感组分集中在22.4~399 μm之内，该组分对气候变化较为敏感，更能反应沉积环境的变化，表明该区域风沙活动强烈，沉积环境主体为风成沉积环境。(4) 灌丛沙丘表层沉积物完全属于风成环境沉积，新月形沙丘和低裸平沙地表层沉积物既有风成环境沉积，又有河流环境沉积。

关键词：灌丛沙丘；新月形沙丘；低裸平沙地；沉积物；粒度特征

风成沉积是地球沉积系统中重要的组成部分，也是全球气候变化、环境变化和人类活动等诸多因素综合作用的结果[1-3]。沙丘是风成沉积的重要表现，沙丘表层沉积物的粒度特征反映着特定的空气动力学和物质来源[4]，蕴含着风沙地貌发育演化的重要信息[5]。由于受到沉积环境、气候和沙源三者之间的复杂相互作用，导致了不同类型风成沉积表层沉积物粒度特征分布的差异性。因此，分析沉积物粒度特征及其沙源，对反演和解释不同沉积物的环境，恢复风成环境、探究沙物质来源具有重要意义[6-8]。

多年来，众多学者对不同地区沙漠中沙丘的粒度特征进行了探讨，新月形沙丘的粒度分布特征研究结果并不完全一致，但出现最多的是丘顶最粗模式和迎风坡脚最粗模式，而针对灌丛沙丘的粒度特征则认为植被的近地表拦截能力越强，沙丘的平均粒径越细[9-10]。在沙丘的研究方面，国外学者运用粒度分析法和端元分析法等在美国西南部沙漠[11-12]、北非沙漠[13-14]和以色列南部沙漠[15]，对沙丘的形态特征、物质组成和沉积环境等方面开展了大量研究工作。国内学者利用粒级-标准偏差法和Sahu成因判别法等在柴达木盆地[16]、科尔沁沙地和乌兰布和沙漠[17]等区域对沙丘的形态、粒度特征和沉积环境进行了系统研究并取得显著成效。但在塔克拉玛干沙漠南缘地区，对于不同下垫面沉积物的粒度特征及沙源的分析相对匮乏。

新疆策勒地区地处塔里木盆地两大主导风向的下风区域，区域内生态环境脆弱，风沙灾害肆虐[18]。因此，本文选取新疆策勒县南部策勒河下游河漫滩区域，对研究区内的新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地表层沉积物粒度特征、环境敏感组成成分和沉积环境进行分析，探讨该地区混杂性沉积的物质来源和沉积环境，为防风固沙工程提供理论借鉴和数据支撑。

1 研究区概况

策勒县北依塔克拉玛干沙漠(35°17′55″~

收稿日期：2023-10-12； **修订日期**：2024-05-21
基金项目：国家自然科学基金地区基金项目(42061003)
作者简介：李鑫鑫(1999-)，女，硕士研究生，主要从事风沙地貌研究. E-mail: 18336585982@163.com
通讯作者：毛东雷. E-mail: donglei6325@sina.com

39°30′00″N，80°03′24″~82°10′34″E)(图1)，南靠昆仑山，属于极端干旱区。策勒县是典型的暖温带大陆性干旱气候，多年平均降水量35.55 mm，蒸发量为2751.6 mm，年平均气温11.9 ℃，气温日较差及年较差大[19]。策勒地区风沙灾害频繁，主导风向为WNW、W，风频占比62.42%~76.25%，年平均沙尘暴日数为20.4 d。砾质戈壁主要分布在绿洲南面、绿洲-沙漠过渡带则分布在策勒县北侧、西缘和东部。采样区域植被多为旱生植物，主要为麻黄(*Ephedrea*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等[20]。

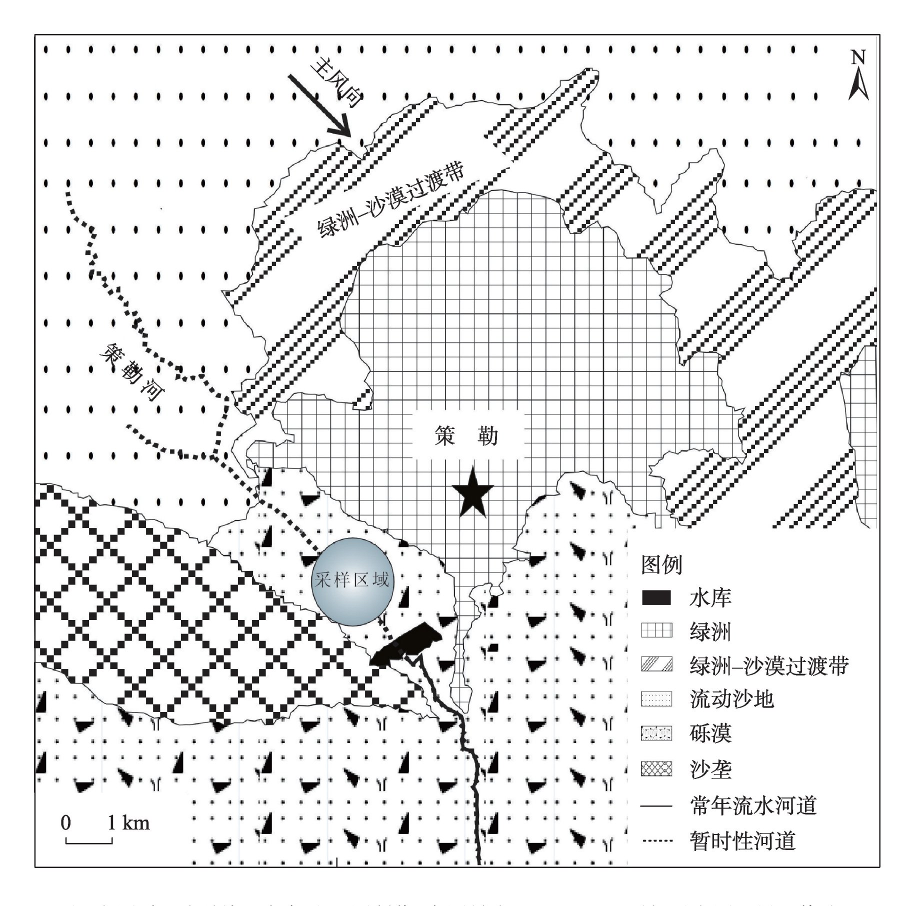
2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

采样区域位于策勒县西南端的策勒河下游，河床为砂砾石干河床，宽约2~5 km。新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地共同分布在此处。该区域气候干旱，降水稀少，植被覆盖度低，下垫面为河漫滩沙地，地势平坦，起伏较小，砾石分布广泛(图2)。在2022年8月下旬对该地区发育典型的特殊地貌新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地表层沉积物进行样品采集。新月形沙丘表层沙物质样品采集按照迎风坡底(WB)、迎风坡中(WM)、沙丘顶部(DT)、兽角(AH)的顺序，取形态大小相似的新月形沙丘3个，共计48个样品(图3)。灌丛沙丘表层沙物质样品采集方式按照迎风坡底(WB)、沙丘顶部(DT)以及背风坡前端(LF)、背风坡中(LM)部、背风坡尾部(LA)的顺序，取大中小三种形态典型的麻黄草沙堆3个，共取24个样品。低裸平沙地选择三个典型样地，按照沙波纹迎风面(WS)、波峰(CW)、背风面(LS)和波谷(TW)的顺序进行样品采集，共取12个样品。每个样品大致在100 g左右，采样深度为表层1 cm。新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地采集点位如图3所示。

2.2 研究方法

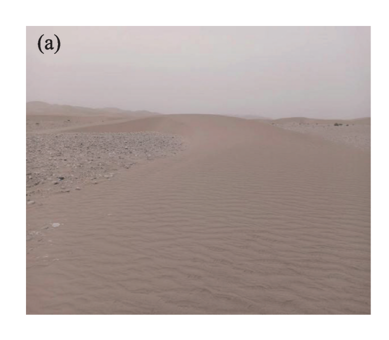
2.2.1 粒度分析法 在处理样品过程中，首先使用筛子和双氧水去除样品内部杂质，然后使用Mastersizer 2000激光粒度分析仪(仪器测量范围为0.02~

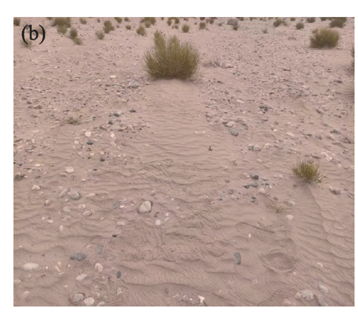


注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2022)3995号，对底图边界无修改。

图1 研究区概况示意图

Fig. 1 Overview of the study area





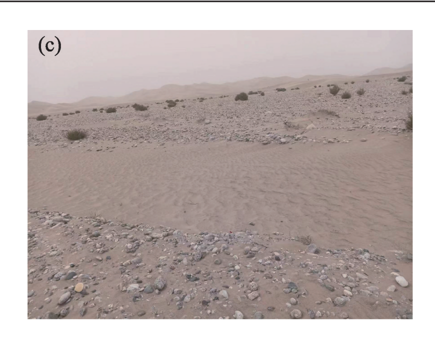


图2 新月形沙丘(a)、灌丛沙丘(b)和低裸平沙地(c)示意图

Fig. 2 Field diagram of barchan dune (a), scrub dune (b) and low bare flat sand (c)

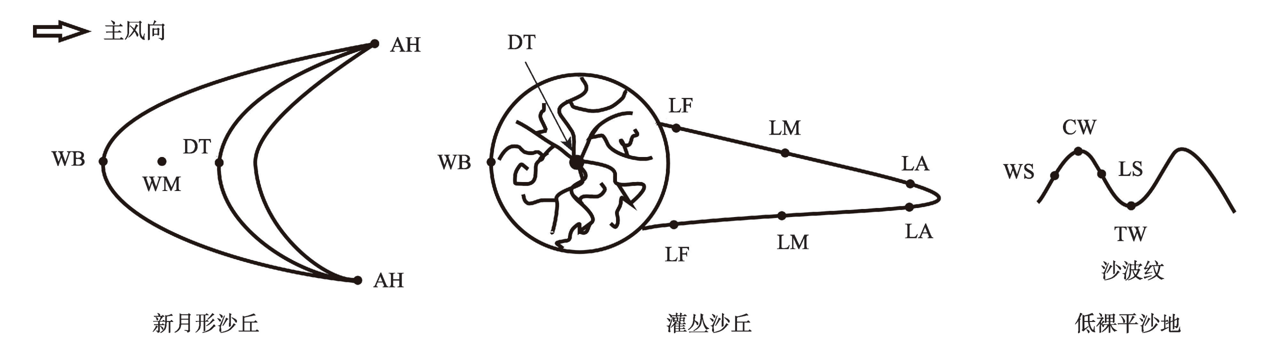


图3 新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地采集点位

Fig. 3 Collection sites of barchan dune, scrub dune and low bare flat sand

2000 μm)对样品进行3次重复测算。最后根据福克-沃德粒度参数公式[21],利用GRADISTAT粒度分析软件得到各粒度参数,并应用Wentworth分类方法[22]进行粒度分级,粒度分级标准如表1所示。

2.2.2 *环境敏感粒级组分分析法* 环境敏感因子是沉积环境演化研究中的重要参数,其提取方法有多种。在干旱和半干旱区沉积环境研究中,粒径-标准偏差法应用广泛[23-24],其方法通过提取环境敏感组分途径,来揭示沉积物粒度对沉积环境变化的响应。当标准偏差曲线呈现双峰或多峰时,表明沉积物物质来源相同但沉积过程不同,或是不同的物质来源与沉积动力相互影响和相互作用所导致,沉积环境不稳定。标准偏差变化曲线主要揭示不同类型沙丘沉积物粒径含量变化的差异性,标准偏差值越大,则反映该沉积物粒级含量差异较大,较高标准偏差值所对应的粒级,即对沉积环境敏感的粒度众数。

表1 粒度分级标准

Tab. 1 Particle size grading standard

类别	粒级	范围/μm
黏土	黏土	0~2
粉砂	极细粉砂	2~4
	细粉砂	4~8
	中细粉砂	8~16
	粗粉砂	16~31
	极粗粉砂	31~63
砂	极细砂	63~125
	细砂	125~250
	中砂	250~500
	粗砂	500~1000
	极粗砂	1000~2000

标准偏差的计算公式如下:

$$s=\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(s_i-s\right)^2\right]/n}$$

式中:s为偏差;n为样本数;s_i为样本值。

2.2.3 *沉积环境判别法* Sahu判别[25]是基于世界各地大量碎屑沉积物样品的统计分析结果建立的风成、海滩、浅海、河流及浊流等5种沉积环境定量化判别公式(表2),具有一定的普遍意义。依据沉积物的平均粒径(M_z)、标准偏差(σ^2)、偏度(SK)和峰度(K_G)4项指标,建立了经验判别公式。本研究在Folk-Ward粒度参数公式计算出4个基本参数的基础上[21],采用Sahu判别公式计算策勒河下游河漫滩地区新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地表层沉积物的判别值,对沉积环境进行判别。

表2 沉积环境判别公式及判定标准

Tab. 2 Sedimentary environment identification formula and criteria

环境鉴别	判别公式	判定标准
风成与海滩	$Y_1=-3.568M_Z+3.7016\sigma^2-2.0766SK+3.1135K_G$	Y<-2.7411，为风成沉积环境 Y>-2.7411，为海滩沉积环境
海滩和浅海	$Y_1=15.6534M_Z+65.7091\sigma^2-18.1071SK+18.5043K_G$	Y<65.3650，为海滩沉积环境 Y>65.3650，为浅海沉积环境
浅海与河流	$Y_1=0.2825M_Z-8.7604\sigma^2+4.8932SK-0.0482K_G$	Y<-7.4190，为河流沉积环境 Y>-7.4190，为浅海沉积环境
河流与浊流	$Y_1=0.7215M_Z-0.40304\sigma^2+6.7322SK+5.2927K_G$	Y<9.8433，为浊流沉积环境 Y>9.8433，为河流沉积环境

3 结果与分析

3.1 沙物质粒度特征

3.1.1 沙物质粒级组成 策勒河下游河漫滩地区风沙沉积物粒径分布范围较窄，主要由砂和粉砂组成，不含黏土和砾石（图4a）。新月形沙丘表层沉积物中砂（43.11%±2.24%）和细砂（25.55%±3.8%）含量较高，其次是粗砂（14.05%±5.09%）、极细砂（12.94%±2.12%）和极粗粉砂（4.18%±0.7%）（图4b）。灌丛沙丘表层沉积物极细砂（50.25%±2.78%）、细砂（24.49%±4.03%）和极粗粉砂（21.74%±2.41%）含量较高，中砂含量较低（图4c）。低裸平沙地表层沉积物极细砂含量最高（37.10%±1.64%），其次是细砂（19.57%±3.09%）、中砂（15.89%±1.28%）、粗砂（14.77%±5.25%）和极粗粉砂（12.01%±0.42%）（图4d）。

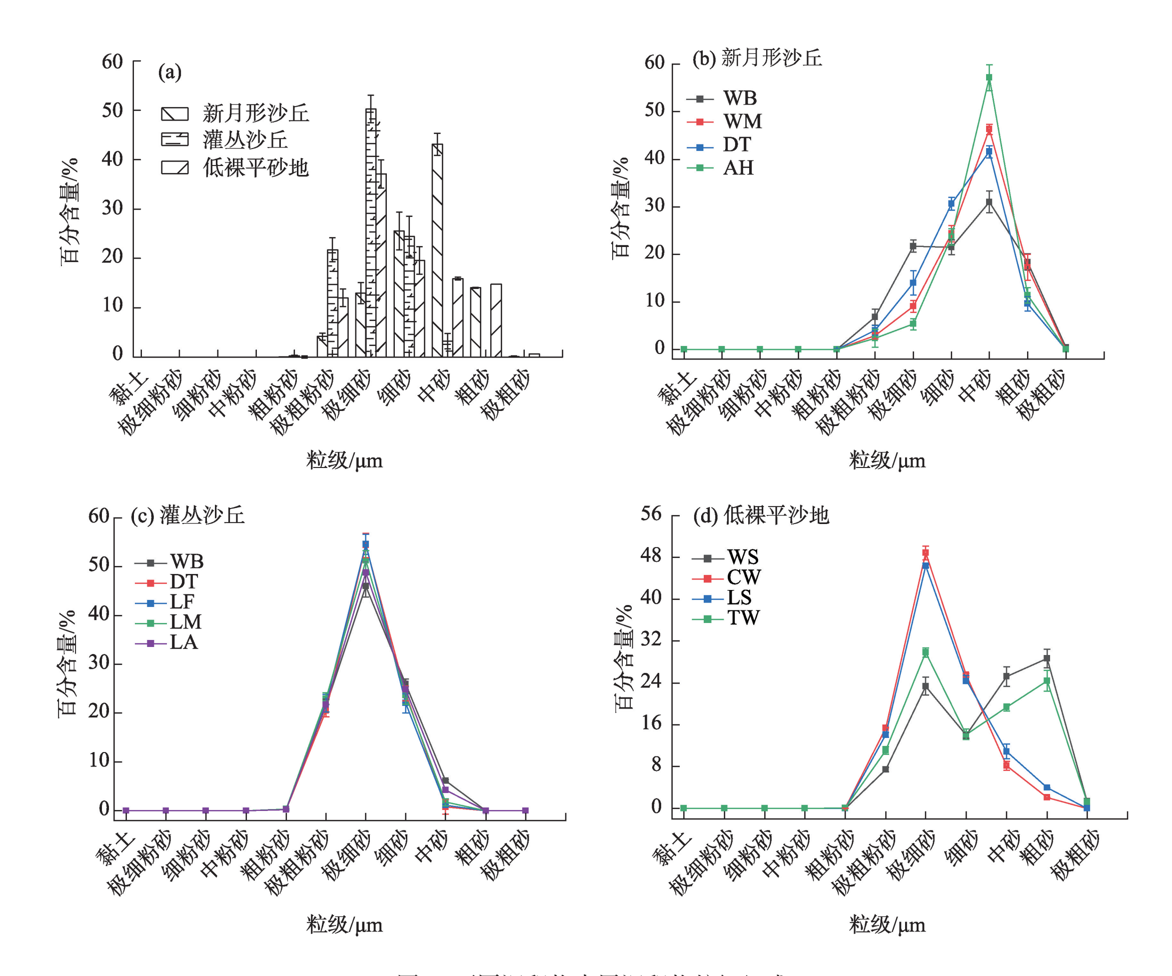


图4 不同沉积物表层沉积物粒级组成

Fig. 4 Surface sediment size composition of different sediments

不同类型风成沉积表层沉积物在粒级含量上存在明显差异,由图4a可知,灌丛沙丘、低裸平沙地表层沉积物以极细砂为主,其次为细砂;新月形沙丘表层沉积物以中砂为主,其次为细砂。新月形沙丘表层沉积物细砂、中砂和极粗砂百分含量高于灌丛沙丘和低裸平沙地,灌丛沙丘表层沉积物粗粉砂、极粗粉砂和极细砂百分含量高于新月形沙丘和低裸平沙地。低裸平沙地表层沉积物粗砂和极粗砂百分含量高于新月形沙丘和灌丛沙丘。

3.1.2　*沙物质粒度参数*　由表3可知,新月形沙丘表层沉积物粒径分布在144.082~576.052 μm之间,粒级在125~1000 μm的沉积物颗粒超过82.71%,主要集中于细砂、中砂和粗砂三个粒级范围;分选系数介于1.489~2.001之间,均值为1.817,且74.47%的样品分选较差;偏度值介于-0.392~0.174,均值为-0.125,45.83%的样品属对称分布;峰度值介于0.734~1.357,均值为0.96,近50%的样品属中等峰态。灌丛沙丘表层沉积物平均粒径分布在81.317~124.129 μm之间,粒级在31~250 μm的沙物质颗粒超过96.48%,主要集中于极粗粉砂、极细砂和细砂三个粒级范围;分选系数介于1.360~2.354之间,均值为1.647,分选较差;偏度值介于-0.016~0.124之间,均值为0.046,87.51%的样品属对称分布;峰度值介于0.809~0.971,均值为0.917,近84%的样品属窄峰态。低裸平沙地表层沉积物平均粒径分布在96.911~299.241 μm之间,粒级在63~500 μm的沙物质颗粒超过72.56%,

表3　新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地沙波纹表层沙物质粒度参数

Tab. 3　Particle size parameters of surface sand ripples in barchan dune, scrub dune and low bare flat sand

沙丘	参数	最小值	最大值	均值±标准差
新月形沙丘	平均粒径/μm	144.082	576.052	270.419±2.726
	分选系数	1.489	2.001	1.817±0.282
	偏度	-0.392	0.174	-0.125±0.0131
	峰度	0.734	1.357	0.969±0.148
灌丛沙丘	平均粒径/μm	81.317	124.129	95.600±1.340
	分选系数	1.360	2.354	1.647±0.140
	偏度	-0.016	0.124	0.046±0.038
	峰度	0.809	0.971	0.917±0.041
低裸平沙地	平均粒径/μm	96.911	299.241	176.677±0.338
	分选系数	1.549	2.671	2.197±0.381
	偏度	-0.426	0.330	0.272±0.278
	峰度	0.636	1.213	0.864±0.219

主要集中于极细砂、细砂和中砂三个粒级范围;分选系数值介于1.549~2.671之间,均值为2.197,66.7%的样品分选差;偏度值介于-0.426~0.330,均值为0.272,71.43%的样品属正偏分布;峰度值介于0.636~1.213,均值为0.864,近50%的样品属窄峰态。

由图5可知,不同类型沉积物粒度参数差异较为显著。新月形沙丘平均粒径最大,灌丛沙丘平均粒径最小。三种风成地貌沉积物分选性均较差。新月形沙丘和灌丛沙丘偏度为对称,低裸平沙地偏

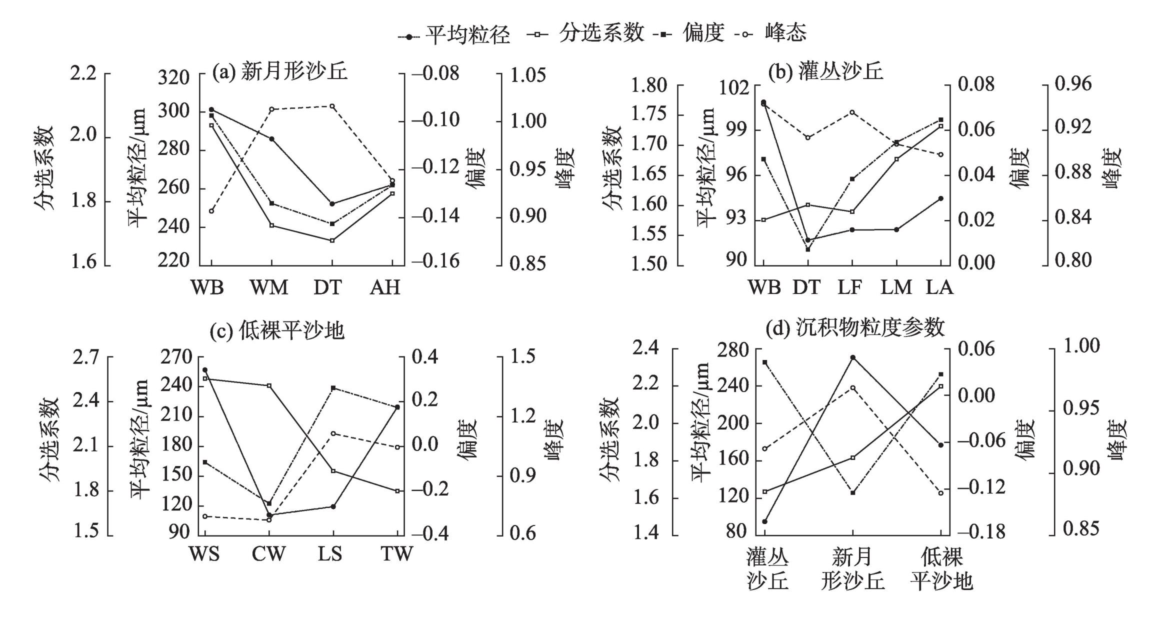


图5　不同沉积物表层沙物质粒度参数变化曲线

Fig. 5　Variation curves of grain size parameters of surface sand materials in different sediments

度为正偏。灌丛沙丘和低裸平沙地峰态为窄峰态，新月形沙丘峰态为中等峰态。

3.2 沉积环境分析

利用Sahu建立的经验判别方法，对新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地表层沉积物进行了环境沉积判别分析。在新月形沙丘中，11个样品判别为风成沉积物（Y<-2.7411），19个样品判别为河流沉积物（Y<-7.4190），18个样品判别为浊流沉积物（Y<9.8433）。灌丛沙丘24个样品判别值Y<-2.7411，判定为风成沉积环境，组成物质为风成沙。低裸平沙地12个样品中，沙波纹背风面和波谷样品组成物质为风成沉积物（Y<-2.7411）；波峰和迎风面判定为河流沉积物（Y<-7.4190）。根据判别结果，新月形沙丘表层沉积物形成环境包括风成沉积和河流冲洪积环境；灌丛沙丘为风成沉积环境；低裸平沙地包括风成沉积和河流冲积环境。综上所述，该区域不同类型沉积物的主要沉积环境为风成沉积，其次为河流冲洪积环境。

粒度累计概率曲线能够描述沉积物的沉积动力特征及其相对比重，段式数量在一定程度上反应了沉积过程的复杂程度。由图6可以看出，策勒地区不同风积地貌的表层沉积物粒度概率累计增长为三段式增长过程，在风沙运动过程中，风速达到颗粒物的启动风动力条件之后，砂物质以悬移、跃移和蠕移三种方式运动。沉积物粒径<25.18 μm的颗粒为悬移运动组分，均不足1%；粒径25.18~178.25 μm的颗粒为跃移运动组分，新月形沙丘、灌丛沙丘、低裸平沙地占比分别为36.5%、94.97%和66.7%；粒径>178.25 μm的颗粒为难风蚀的蠕移或风蚀残余组分，新月形沙丘、灌丛沙丘、低裸平沙地占比分别为63.4%、4.76%和33.3%。综上所述，新月形沙丘以蠕移组分为主，其次是跃移和悬移，灌丛沙丘和低裸平沙地以跃移组分为主，其次是蠕移和悬移。

3.3 环境敏感粒级组分分析

沉积物粒度环境敏感粒级组分可以作为反演气候和环境变化的重要指标。利用粒级-标准偏差法，提取策勒河下游河漫滩区域不同类型风成沉积表层沉积物的环境敏感粒级组分，风成环境下沉积物粒度一般集中在100~1000 μm之间，60~550 μm可以指示区域风沙活动的强度。新月形沙丘标准偏差值

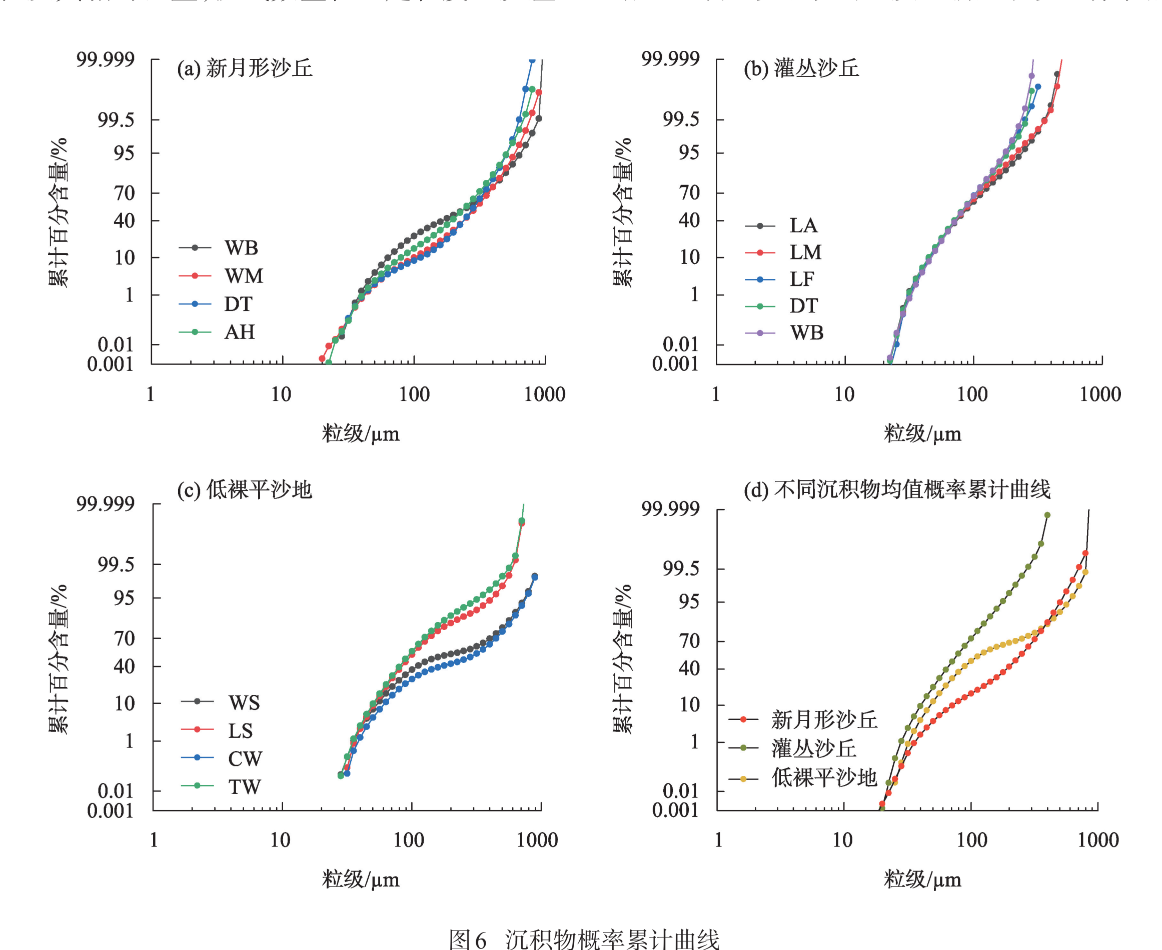


图6　沉积物概率累计曲线

Fig. 6　Sediment probability accumulation curve

呈现三峰态势(图7a),高峰值粒径为563.67 μm,次高峰值粒径为251.79 μm和79.62 μm,据此可将沉积环境变化敏感的粒度组分分为组分1(<35.56 μm),组分2(35.56~126.19 μm),组分3(126.19~355.65 μm),组分4(>355.65 μm)。灌丛沙丘中(图7b),高峰值粒径为200 μm,次高峰值粒径为63.25 μm,据此可将沉积环境变化敏感的粒度组分分为组分1(<22.4 μm),组分2(22.4~112.46 μm),组分3(>112.46 μm)。低裸平沙地高峰值粒径为709.62 μm(图7c),次高峰值粒径为224.41 μm,据此可将沉积环境变化敏感的粒度组分分为组分1(<31.7 μm),组分2(31.7~399 μm),组分3(>399 μm)。根据各组分的分布范围分别计算不同沙丘沉积物的百分含量,新月形沙丘表层沉积物百分含量组分2为0.51%~19.54%,组分3为3.19%~54.41%,组分4为7.14%~27.62%,组分1百分含量小于1%忽略不计。灌丛沙丘表层沉积物百分含量分别为组分2为0.25%~73.09%,组分3为6.4%~26.9%,组分1百分含量小于1%忽略不计。低裸平沙地表层沉积物百分含量组分2为0.68%~81.01%,组分3为3.38%~18.79%,组分1百分含量小于1%忽略不计。由此可以看出,新月形沙丘组分3(126.19~355.65 μm)、灌丛沙丘组分2(22.4~112.46 μm)和低裸平沙地组分2(31.7~399 μm)对环境的指示意义和影响更大,同时策勒河下游河漫滩地区沙丘敏感粒级组分集中在60~550 μm之内,表明该区域风沙活动强烈,沉积环境主体为风成沉积环境。

4 讨论

三种风积地貌都是由于风力作用而形成的,沙粒来自于附近的河流、沙漠或其他风化侵蚀作用。除了风力和流场对沙粒搬运和堆积的影响外,下垫面的复杂性也是不可忽视的重要因素。复杂的下垫面会使气流呈现多尺度涡旋和离散运动,导致沙粒发生跳跃搬运和选择性富集。在不同速度和方向的风作用下,局部地形和地质条件下[26],沙丘可能呈现出不同的形态和特征。不同来源的沙粒可能在同一地区堆积,形成来源混杂的风沙堆积[27]。新月形沙丘表层沉积物主要为风成沉积和河流沉积环境,灌丛沙丘表层沉积物主要为风成沉积环

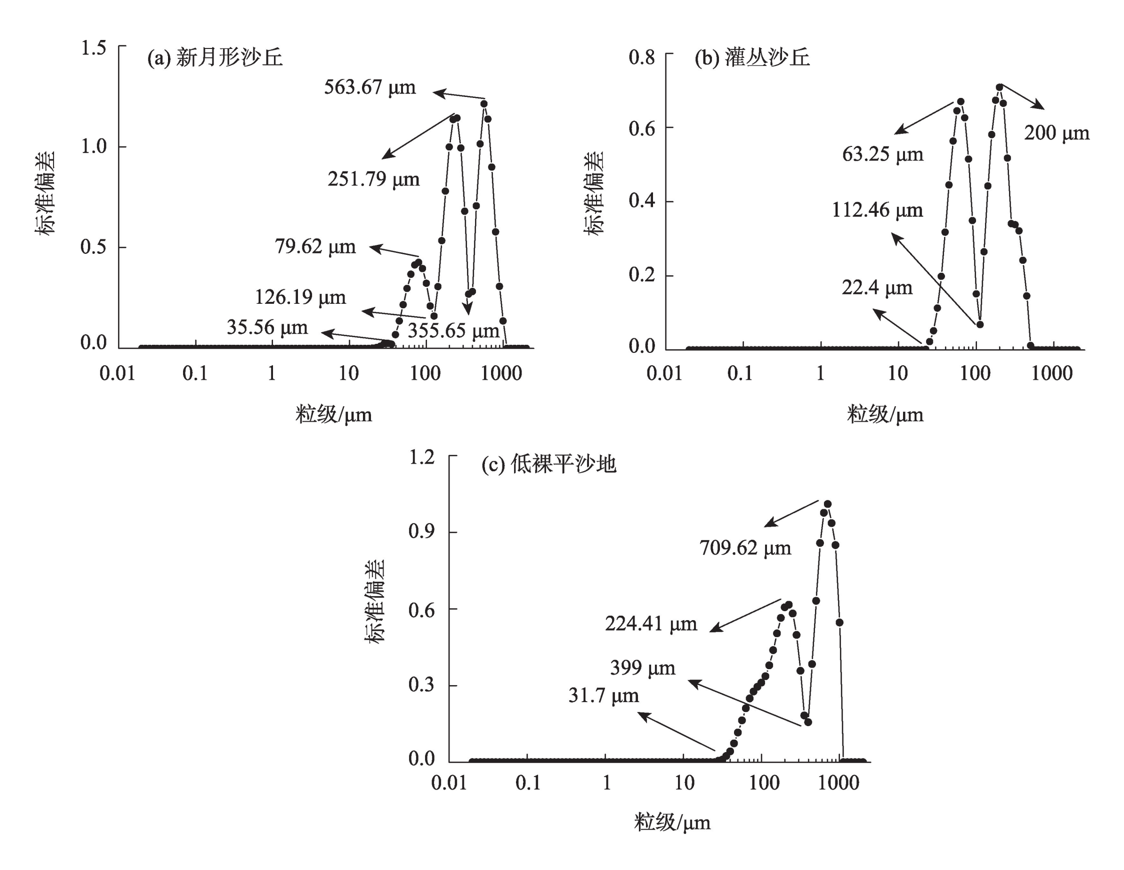


图7 沉积物粒级-标准偏差曲线

Fig. 7 Grain size-standard deviation curve for different sediment types

境。这主要是由于新月形沙丘位于策勒河下游河漫滩地区,河流在夏季汛期时会有水流经过,河流的冲洪积物为沙丘表层沙物质的主要物源,同时受到风力作用的影响,沙丘部分表层沉积物来源于上风向沉积物长时间风蚀并搬运堆积,因此,沙丘沉积物具有混杂性沉积特征。灌丛的生长使得风场发生改变,沙粒受到拦截,风携带沙粒的能力下降,因此,灌丛沙丘表层沉积物多以拦截的近地表风成沉积物为主[28-29]。低裸平沙地地势低平,物质来源主要为河流残留的冲洪积物和外来风力搬运风成碎屑物。这与穆桂金等[30-32]对塔克拉玛干沙漠沙物质粒度分析结论相符合,风成沙的物质来源与周围各大水系密切相关,河流附近沙丘沙与河流沙之间具有亲缘关系。

本文将传统的粒度分析方法与环境敏感粒级组分提取等新方法相结合,通过分析不同风沙地貌(新月形沙丘、灌丛沙丘、低裸平沙地),揭示了不同下垫面环境下沉积物粒度特征的异同,增加了研究的代表性和可比性。虽然,本研究采用了一些常见的粒度分析方法,但这些传统方法在一定程度上存在不足,难以从微观尺度上全面反映沙粒的形态和组分特征。近年来,一些新兴分析技术为沙粒形态和组分的高精度表征提供了新的思路,如X射线衍射技术[33]、扫描电镜技术[34]等,未来可以考虑与传统方法相结合,能够更好地分析沙粒微观结构与宏观粒度参数之间的对应关系。另一个值得关注的问题是缺乏长期动态观测数据,沉积物的粒度特征并非静止不变的,会随着风力、流量等外力条件的变化而发生动态演变[35]。单次取样很难反映出其时空变化规律,未来需要建立长期定点观测系统,结合遥感监测等手段,揭示沉积物粒度的季节性和年际变化特征。

5 结 论

本研究通过对策勒河下游河漫滩地区的新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地表层沉积物的粒度特征、环境敏感粒级组分和沉积环境进行分析,得到以下结论:

(1) 在粒级组成方面,不同类型风成沉积表层沉积物粒级组成均以中砂、细砂和极细砂为主。灌丛沙丘沙波纹表层沉积物粒径由背风坡尾部至前端趋于细化,新月形沙丘表层沉积物粒径由迎风坡底部至顶部趋于粗化。

(2) 在粒度参数方面,新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地表层沉积物平均粒径分别为270.42 μm、95.60 μm和176.68 μm,低裸平沙地表层沉积物分选性最差(2.197),其次为新月形沙丘(1.817)和灌丛沙丘(1.647)。灌丛沙丘、新月形沙丘和低裸平沙地表层沉积物偏度值分别为-0.125、0.046、0.272,分别呈现对称、负偏和极负偏分布。新月形沙丘、灌丛沙丘和低裸平沙地表层沉积物峰度值均<3,说明数据集中在均值附近的概率更小。

(3) 策勒河下游河漫滩区域沉积物的沉积环境既有风成沉积环境,又有河流冲积环境,新月形沙丘沙粒运动方式以蠕移为主,灌丛沙丘和低裸平沙地沙粒运动方式以跃移为主。

(4) 策勒河下游河漫滩区域不同风积地貌环境敏感组分集中在22.4~399 μm之内,该组分对气候变化较为敏感,更能反应沉积环境的变化,表明该区域风沙活动强烈,沉积环境主体为风成沉积环境。

参考文献(References):

[1] 陈京平, 余子莹, 杨帆, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴对新月形沙丘表面粒度变化的影响[J]. 干旱区地理, 2023, 46(12): 1995-2004. [Chen Jingping, Yu Ziying, Yang Fan, et al. Effect of sandstorms on surface particle size variation of barchan dunes in the hinterland of Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(12): 1995-2004.]

[2] 刘鑫, 高鑫. 塔克拉玛干沙漠南缘新月形沙丘移动特征[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 661-673. [Liu Xin, Gao Xin. Migration velocity of barchan dunes at the southern margin of the Taklamakan Desert[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 661-673.]

[3] 李小乐, 魏亚娟, 党晓宏, 等. 红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 933-942. [Li Xiaole, Wei Yajuan, Dang Xiaohong, et al. Soil mechanical composition and soil nutrient content of *Reaumuria soongorica* nebkhas[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 933-942.]

[4] 孔霄, 来风兵, 陈蜀江, 等. 别里库姆沙漠胡杨回涡沙丘表层沉积物粒度特征[J]. 现代地质, 2021, 35(3): 657-664. [Kong Xiao, Lai Fengbing, Chen Shujiang, et al. Grain size features of surface sediments from *Populus euphratica* echo dunes in the Brikum Desert[J]. Geoscience, 2021, 35(3): 657-664.]

[5] 董治宝, 屈建军, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌区划[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 805-814. [Dong Zhibao, Qu Jianjun, Qian Guangqiang, et al. Aeolian geomorphological regionalization of the Kumtagh Desert[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 805-814.]

[6] Zhang Chunlai, Shen Yaping, Li Qing, et al. Sediment grain-size

characteristics and relevant correlations to the aeolian environment in China's eastern desert region[J]. Science of the Total Environment, 2018, 627(1): 586-599.

[7] Shen Yaping, Zhang Chunlai, Wang Rende, et al. Spatial heterogeneity of surface sediment grain size and aeolian activity in the Gobi desert region of northwest China[J]. Catena, 2020, 188(2): 104-120.

[8] 何强强, 毛东雷, 徐佳瑞, 等. 策勒绿洲-沙漠过渡带不同沙丘的沉积物粒度特征及沉积环境[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 135-145. [He Qiangqiang, Mao Donglei, Xu Jiarui, et al. Sediment granularity characteristics and deposition environment of different dunes in the Cele oasis-desert ecotone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 135-145.]

[9] 朱文煜, 毛东雷. 植被沙障下沙丘的研究进展[J]. 生态科学, 2023, 42(2): 228-237. [Zhu Wenyu, Mao Donglei. Review on vegetation sand-barrier dune[J]. Ecological Science, 2023, 42(2): 228-237.]

[10] 任孝宗, 王嵩松, 王亚梅, 等. 浑善达克沙地西部新月形沙丘和抛物线沙丘共存区的地貌特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 2016-2030. [Ren Xiaozong, Wang Songsong, Wang Yamei, et al. Geomorphologic characteristics of the co-existence zone of barchan and parabolic dunes in western Hunshandake Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(12): 2016-2130.]

[11] Sharp R P. Wind ripples[J]. Journal of Geology, 1963, 71(5): 617-636.

[12] Zimbelman J R, Irwin III R P, Williams S H, et al. The rate of granule ripples movement on Earth and Mars[J]. Icarus, 2009, 203(1): 71-76.

[13] Wilson I G. Aeolian bedforms: Their development and origins[J]. Sedimentology, 1972, 19: 173-210.

[14] Ellwood J M, Evans P D, Wilson I G. Small scale aeolian bedforms[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1975, 45: 554-561.

[15] Yizhap H, Isenberg O, Wenkart R, et al. Morphology and dynamics of aeolian mega-ripples in Nahal Kasuy, southern Israel[J]. Israel Journal of Earth Sciences, 2008, 57(3): 149-165.

[16] 王利杰, 肖锋军, 董治宝, 等. 柴达木盆地巨型沙波纹条带表层沉积物粒度和地球化学元素组成特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(11): 1826-1835. [Wang Lijie, Xiao Fengjun, Dong Zhibao, et al. Characteristics of grain size and geochemical elements composition of surface sediments of megaripple stripes in the Qaidam Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(11): 1826-1835.]

[17] 李鹤, 丁占良, 尤莉, 等. 乌兰布和沙漠西北缘大型沙波纹的初步研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(9): 129-136. [Li He, Ding Zhanliang, You Li, et al. A preliminary study of large-scale ripples in the northwest margin of Ulan-buh Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(9): 129-136.]

[18] 苏松领, 毛东雷, 蔡富艳, 等. 新疆策勒沙漠与砾质戈壁新月形沙丘表面沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(8): 124-132. [Su Songling, Mao Donglei, Cai Fuyan, et al. Grain-size characteristics and sedimentary environment of sediments on the surfaces of crescent-shaped dunes in the desert and gravel Gobi in Cele, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(8): 124-132.]

[19] 俞胜清, 阿布都米基提, 周向玲, 等. 新疆喀拉库姆沙漠新月形沙丘不同部位粒度特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1629-1635. [Yu Shengqing, Abdu Mijiti, Zhou Xiangling, et al. Grain size characteristics of different parts of crescent dunes in Kalakum Desert, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(6): 1629-1635.]

[20] 何强强, 毛东雷, 朱文煜, 等. 新疆策勒绿洲-沙漠过渡带不同植被下的沙丘形态特征及沉积物粒度分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 70-81. [He Qiangqiang, Mao Donglei, Zhu Wenyu, et al. Morphological characteristics and sediment particle size analysis of sand dunes with different vegetations in the Cele Oasis-Desert Ecotone, Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 70-81.]

[21] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3-26.

[22] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. Journal of Geology, 1922, 30(1): 377-392.

[23] 高永, 丁延龙, 汪季, 等. 不同植物灌丛沙丘表面沉积物粒度变化及其固沙能力[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 135-142. [Gao Yong, Ding Yanlong, Wang Ji, et al. Sediments particle size changes and its sand fixation ability for different shrub dunes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 135-142.]

[24] 郝榕荣, 杨怡红, 朱龙海, 等. 环境敏感因子在威海湾沉积环境中的应用比较[J]. 沉积学报, 2023, 41(3): 763-777. [Hao Rongrong, Yang Yihong, Zhu Longhai, et al. Application of environmentally sensitive factors in Bay sedimentary environments[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(3): 763-777.]

[25] 安庆, 安萍, 徐汝汝, 等. 青藏高原不同地区沉积物的粒度特征与沉积环境判别公式适用性对比研究[J]. 聊城大学学报:自然科学版, 2017, 30(4): 37-47. [An Qing, An Ping, Xu Ruru, et al. Comparative study on grain size characteristics of sediments in the different regions of the Tibetan Plateau and the applicability of sedimentary environment discriminant formulas[J]. Journal of Liaocheng University(Natural Science Edition), 2017, 30(4): 37-47.]

[26] 董治宝, 吕萍. 70年来中国风沙地貌学的发展[J]. 地理学报, 2020,75(3): 509-528. [Dong Zhibao, Lv Ping. Development of aeolian geomorphology in China in the past 70 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(3): 509-528.]

[27] 郎丽丽, 王训明, 哈斯, 等. 灌丛沙丘形成演化及环境指示意义研究的主要进展[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1526-1536. [Lang Lili, Wang Xunming, Ha Si, et al. Coppice dune formation and its significance to environmental change reconstructions in arid and semiarid areas[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1526-1536.]

[28] 王佩, 马倩, 朱元璞, 等. 新疆图开沙漠灌丛沙堆和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1644-1653. [Wang Pei, Ma Qian, Zhu Yuanpu, et al. Grain size characteristics and sedimentary environment of surface sediments from nebkhas and parabolic dunes in the Tukai Desert, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1644-1653.]

[29] 贺振杰, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 哈萨克斯坦巴尔喀什湖沉积物粒度特征及其对区域环境变化的响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1317- 1327. [He Zhenjie, Ma Long, Jilili Abudu-Waili, et al. Grain-size characteristics of Lacustrine in Balkhash Lake, Kazakhstan and its response to regional environmental changes[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1317-1327.]

[30] 穆桂金. 塔克拉玛干沙漠的形成时代及发展过程[J]. 干旱区地理, 1994, 17(3): 1-9. [Mu Guijin. On the age and evolution of the Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 1994, 17(3): 1-9.]

[31] 田伟东, 杨军怀, 王树源, 等. 雅鲁藏布江河谷沙丘沉积物粒度特征及其环境指示[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(1): 128-134. [Tian Weidong, Yang Junhuai, Wang Shuyuan, et al. Grain size characteristics of sand dunes in the Yarlung Zangbo River valley, southern Tibetan Plateau and its environmental implications [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36 (1): 128-134.]

[32] Qian Guangqiang, Dong Zhibao, Zhang Zhengcai, et al. Granule ripples in the Kumtagh Desert, China: Morphology, grain size and influencing factors[J]. Sedimentology, 2012, 59(6): 1888-1901.

[33] Sedda L, De Giudici G, Fancello D, et al. Unlocking strategic and critical raw materials: Assessment of zinc and REEs enrichment in Tailings and Zn-Carbonate in a historical Mining Area (Montevecchio, SW Sardinia)[J]. Minerals, 2024, 14: 3.

[34] Karimi S, Farshbaf Aghajani H. The strength and microstructure of cemented sand-gravel (CSG) mixture containing fine-grained particles[J]. Geo-Engineering, 2023, 14: 5.

[35] Creane S, O'Shea M, Coughlan M, et al. Morphological modelling to investigate the role of external sediment sources and wind and wave-induced flow on sand bank sustainability: An arklow bank case study[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2027, 11: 10.

Grain size characteristics and sand source analysis of three aeolian landforms in the lower reaches of the Qira River floodplain

LI Xinxin[1,2], MAO Donglei[1,2], LAI Fengbing[1,2], XUE Jie[3,4], HE Qiangqiang[1,2], MA Yujiao[1,2]

(1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Region, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystems, Cele 848300, Xinjiang, China)

Abstract: The grain size characteristics of sediments provide extensive information on environmental change, which is of great importance for the study of desert management and for preventing desertification. The grain size characteristics and sedimentary environment stability of different aeolian landforms were studied using grain size analysis, the grain size-standard deviation method, and Sahu genetic discrimination. The results show that: (1) The surface sediments of barcrescent dune s, scrub dunes, and low bare flat sand are dominated by medium sand, fine sand, and extremely fine sand. The surface sediments were coarsest in barcrescent dunes and smallest in scrub dunes, with average grain sizes of 270.42 μm and 95.60 μm, respectively. (2) The sediment sorting of the three geomorphic types was poor, with proportions of 74.47%, 90.47% and 66.7%, respectively. The surface sediments of barcrescent dunes have a negatively skewed distribution and medium peak state, whereas the surface sediments of scrub dunes and low bare flat sand have a symmetrical distribution, medium peak state, and narrow peak state. (3) The environmentally sensitive components of the three different aeolian landforms were concentrated in the size range from 22.4-399 μm, which is more sensitive to climate change and therefore more able to reflect changes in the sedimentary environment, indicating that the aeolian sedimentary environment is mainly dominated by aeolian sedimentary environment. (4) The surface sediments of scrub dunes were found wholly in the aeolian environment, and the surface sediments of barchan dunes and low bare flat sand were found in both aeolian and fluvial environments.

Keywords: shrub-coppice dune; barchan dune; low bare flat sandy land; deposit sediment; particle size characteristics